

有轨电车侧面碰撞乘员保护设计研究

李 铎, 肖守讷, 袁成标

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为研究侧面碰撞中有轨电车耐碰撞性及乘员保护能力, 建立了带假人的某5节编组100%低地板有轨电车及某6120型大客车有限元模型, 设计了大客车以30 km/h速度侧面90°撞击静止在直线轨道上有轨电车悬浮模块的碰撞场景, 使用LS-DYNA显式动力学软件模拟整个碰撞过程。研究表明, 原结构有轨电车悬浮模块侧墙在碰撞力的作用下产生塑性变形侵入生存空间, 被撞侧座椅缺乏对乘员的保护限制作用, 在撞击力的作用下乘员易飞出, 同时惯性作用易使颈部产生挥鞭损伤。通过设计侧墙嵌入防撞杆, 设置座椅侧墙分离, 增加头枕和安全带等措施能提高侧墙耐碰撞性并有效改善乘员损伤指标, 保护侧面碰撞中乘员安全。

关键词: 被动安全; 有轨电车; 侧面碰撞; 乘员保护; LS-DYNA 仿真

中图分类号: U482.1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.02.021

Study on Occupant-protecting Design of Tram Car under Side Impact

LI Duo, XIAO Shoune, YUAN Chengbiao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to study the crashworthiness and occupant-protecting ability of tram car under side impact accident, a 5-module 100% low-floor tram car with dummy and a 6120 bus FEM models were established. By designing the impact scenario that a low-floor tram car parking on the rail impacted perpendicularly on the side faces of floating module by a bus with the velocity of 30 km/h and simulating the whole process of crash in LS-DYNA. It was shown that deformation was generated and occupant on the impacted side was pushed off the chair in designed scenario due to the impact force, which also caused the whiplash injury of occupant without neck protection. Designing guard bar in sidewall, separate seat from sidewall and install headrest and seatbelt will improve the crashworthiness of tram car and decrease injury criterion and provide occupants a safer ride environment.

Keywords: passive safety; tram car; side impact; occupant protection; LS-DYNA simulation

0 引言

与传统铁路车辆不同, 有轨电车路权形式的特殊性决定了其事故形态的多发性和多样性, 现阶段铁路碰撞标准和相关研究主要集中于列车纵向耐碰撞性, 针对有轨电车侧面碰撞安全性的研究相对较少。目前铁路领域广泛使用的欧洲标准 EN 15227 (Railway applications-Crashworthiness requirements for railway

vehicle bodies) 中将有轨电车归于 C-IV 类, 分别规定了相同编组有轨电车 15 km/h 相对速度的对撞以及有轨电车以 25 km/h 速度与 3 t 刚性障碍物碰撞 2 种工况, 并没有规定有轨电车侧碰事故的代表工况。而对于有轨电车, 其在运营过程中有侧面受到公路车辆碰撞的可能性, 这超出车辆纵向碰撞的研究范畴, 所开展的研究也相对较少。早在 2008 年, 在美国联邦铁路局和交通发展公司发起的研究项目 TCRP (Transit Cooperative Research Program) 中, 专门围绕轻轨车辆耐碰撞性开展了仿真计算工作, 针对轻轨车辆侧面结

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-05-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682015CX046); 国家科技支撑计划项目(2015BAG12B01-15)

构, 设计了某 SUV 汽车分别以 40 km/h 和 56 km/h 速度侧面撞击静止轻轨车辆的 2 种工况, 考察了车体侧墙变形与生存空间侵入量, 指出了开展轻轨车辆侧面结构碰撞防护设计的必要性^[1]; 文献 [2-3] 从动力学角度研究了干线铁路列车在平交道口侧面受到重载卡车冲击后的脱轨机理以及脱轨风险对侧向护轨机构参数的敏感性; 文献 [4] 探讨了二系主动悬挂系统在列车横风稳定性控制中的应用; 在结构方面, 文献 [5] 采用试验手段研究了低地板大巴车侧墙板蜂窝铝夹层三明治结构的低速冲击响应等等; 其余大部分研究主要集中在传统的纵向耐碰撞性的研究上, 例如文献 [6] 开展了有轨电车纵向耐碰撞结构改进工作, 文献 [7] 研究了城际动车组头车的耐碰撞性能^[7], 以及后来相关领域研究人员开展的有轨电车与公路机动车的碰撞响应研究^[8-10]。

综上所述, 目前针对侧面碰撞中有轨电车车体耐碰撞性及乘员安全的动力学仿真及试验的相关标准和研究不是很完善。本文结合有轨电车路权特殊性背景, 建立了带假人某 5 节编组 100% 低地板有轨电车及某 6120 型大客车有限元模型, 设计了大客车侧面撞击低地板有轨电车的工况, 研究了有轨电车碰撞后车体的位移、变形等动力学响应以及乘员的生物学损伤指标, 并借鉴汽车被动安全设计经验, 从乘员保护角度给出了有轨电车侧面碰撞安全设计建议。

1 侧面碰撞计算模型

1.1 有轨电车及 6120 客车有限元模型

图 1 所示为某 5 节编组 100% 低地板有轨电车有限元模型, 各模块分别用 A1~A5 表示, 其中 A1、A3 和 A5 为动/拖车模块, A2 和 A4 为悬浮模块, 各模块之间通过铰接方式相互连接并传递作用力, 铰接机构分为固定铰 (j1)、转动铰 (j2) 和自由铰 (j3)。有轨电车动车及拖车模块底架使用 Q355 钢材, 侧墙、端墙、车顶部分使用 6 系铝合金型材, 各部件通过焊接、铆接和螺栓连接等方式形成整体承载结构, 悬浮模块为全铝合金型材车体。考虑走行部悬挂、止挡, 车间纵向减振器以及轮轨接触, 有轨电车整备质量 59 t。



图 1 有轨电车有限元模型

大客车作为公路车辆的典型代表, 相比于小型乘用车, 其质量更大, 事故后果也往往更为严重, 因此本文选择将大客车作为研究低地板有轨电车侧面碰撞响应的工具, 文中建立的大客车模型为典型的 6120 型大客车 (用字母 B 表示), 如图 2 所示。客车长约 12 m, 宽约 2.5 m, 高约 3.4 m, 整车骨架为不同截面的 Q345 矩形薄壁梁焊接而成的整体承载结构。模型忽略了客车蒙皮、内饰等非承载结构, 考虑了悬架的牵引和悬

挂特性。客车整备质量 12 t。

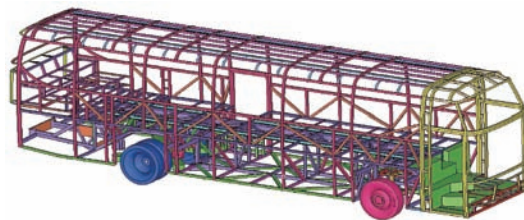


图 2 公路 6120 型大客车有限元模型

1.2 碰撞场景设计

鉴于路面发生碰撞事故时车辆的速度、碰撞角度、相对位置、乘员载重等因素随机性较大, 因此本文所设计的碰撞场景只能作为典型算例, 用于研究低地板有轨电车在遭遇侧面冲击事故时的响应。同时在设计碰撞场景时在适当简化的基础上, 遵循了如下原则:

①文章主要研究对象为车体耐碰撞性及乘员安全, 不考察有轨电车运动中的脱轨机理, 同时为减少研究变量, 文中低地板有轨电车速度设为 0, 只单纯考虑有轨电车静止状态下侧面受到冲击时的碰撞响应。

②忽略乘员质量对碰撞的影响, 发生碰撞的低地板有轨电车和大客车均处于整备状态。

③大客车只具备低地板有轨电车横向相对速度, 即碰撞交角为 90°。

④考虑大客车在市区运营时受到车流、交通灯管制、路况等多方面因素影响, 车辆需频繁地启动制动、加速减速, 根据统计数据, 其运行速度一般低于乘用车 (汽车标准中乘用车碰撞速度一般为 50 km/h), 通常在 20~40 km/h^[11], 本文中取其平均值 30 km/h 作为大客车的碰撞速度。

⑤由于大客车撞击位置在有轨电车侧墙中下部, 对应动/拖车模块走行部高强度区 (乘员区下方), 对应悬浮模块的铝合金侧墙 (乘员区), 后者更为危险, 因此设计工况中以悬浮模块作为大客车碰撞对象。

结合上述原则, 确定模型计算坐标系, 设计碰撞场景如图 3 所示, 静止在平行于 x 轴直线轨道上的整备状态低地板有轨电车 A2 模块侧面受到沿 y 轴正方向运动速度 $V_B=30$ km/h 的 6120 型大客车碰撞, 大客车纵向中垂面通过悬浮模块中心对齐 A2 模块车体中心。

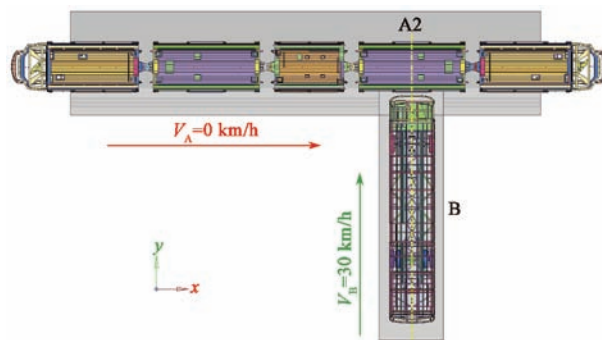


图 3 设计碰撞场景

同时, 文章建立了有轨电车悬浮模块被撞击侧

的乘员座椅模型, 并使用汽车碰撞中广泛应用的 Hybrid-III 型 50 百分位成年男性假人模型以研究侧面碰撞对乘员安全的危害, 如图 4 所示。

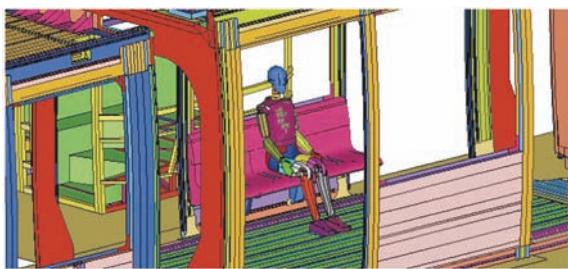


图 4 被撞侧座椅与乘员假人

2 碰撞响应与防护设计

2.1 车体变形

与传统的车辆纵向碰撞不同, 侧面碰撞不具备多级缓冲吸能体系, 冲击力直接作用在车体侧面, 如图 5 所示, 碰撞过程中界面力峰值达到 1 120 kN。

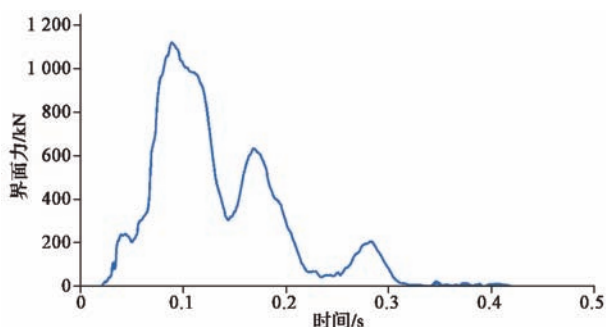


图 5 大客车与有轨电车碰撞界面力

在冲击力的作用下, 悬浮模块侧墙产生了明显的塑性变形, 这是由于悬浮模块无走行部, 侧墙结构承受了来自大客车的全部冲击力, 此外悬浮模块为全铝合金型材结构, 强度较弱, 因此侧墙绕与底架连接处形成的塑性铰转动侵入乘客区, 如图 6 所示, 测得侧墙横向最大侵入量约 300 mm。

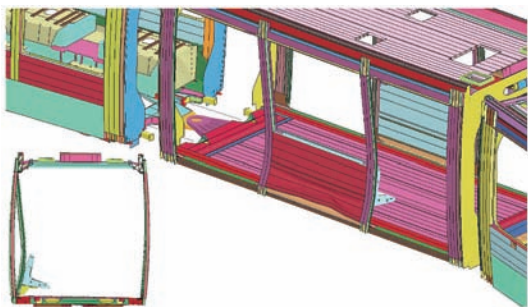


图 6 悬浮模块侧墙塑性变形

2.2 乘员响应

碰撞过程中被撞侧乘员假人运动响应如图 7 所示。

分析可知, 由于座椅安装在侧墙上, 座椅在碰撞过程中随着侧墙的变形侵入而运动, 座椅靠背推动乘员向前运动, 同时在惯性的作用下, 乘员颈部产生类似于汽车追尾碰撞的鞭打运动, 最终乘员整体向前飞出。

可见侧面碰撞中乘员头部后仰运动过于剧烈, 容

易对被撞击侧乘员颈部造成挥鞭损伤, 座椅随侧墙运动且缺乏束缚能力, 致使乘员飞出, 设计者应重视侧面碰撞的可能性与危害并在设计中考虑侧面碰撞乘员保护设施的投入。

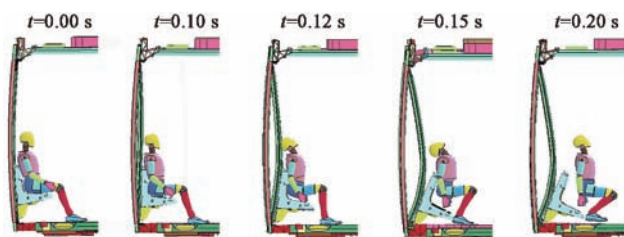


图 7 被撞侧乘员运动响应

2.3 乘员保护设计改进

针对侧面碰撞中车体及乘员的响应, 借鉴汽车被动安全防护经验, 提出如下改进方案:

①侧墙铝合金型材内采用螺栓连接的方式嵌入防撞杆 (文中算例为 30 mm × 40 mm 矩形截面空心梁, 壁厚 3 mm, 材料为 Q345 钢), 将碰撞力流传递到底架及车顶, 控制侧墙变形, 降低生存空间侵入量, 如图 8 所示。

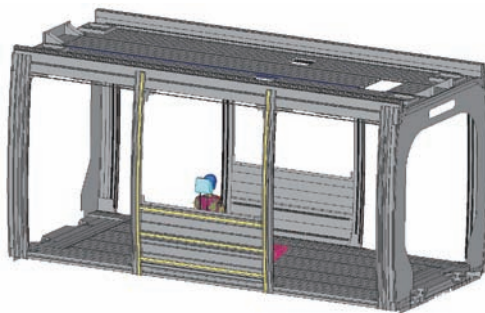


图 8 侧墙防撞杆

②取消座椅固定在侧墙上的安装方法, 将座椅与侧墙分开, 改为与地板连接, 避免座椅随侧墙变形而发生运动。同时在侧墙与座椅之间安装压溃式吸能盒 (文中为 8 个四周开长度渐变卸载槽的铝合金箱形结构, 截面为边长 85 mm 的正方形截面, 壁厚为 2 mm, 卸载槽之间添加隔板将吸能盒分割为多个吸能单元, 便于逐步压溃), 用来吸收侧面碰撞能量。

③设置后靠枕保护乘员颈部, 减轻挥鞭损伤, 同时设置肩部和腰部安全带限制乘员位移, 避免飞出撞伤。

图 9 所示给出了针对侧面碰撞乘员保护改进前后的方案对比。

改进方案仿真结果如图 10 所示, 侧墙变形量相对于原结构有明显下降, 最大侵入量降为 120 mm。座椅与侧墙分离, 未随侧墙运动, 为乘员提供支撑, 吸能盒在压溃的同时吸收了部分碰撞能量。座椅后靠枕有效抑制了乘员头部的惯性鞭打运动, 改善乘员颈部受力, 乘员在侧面冲击过程中受到座椅的推动有向前飞出的趋势, 改进方案中肩部和腰部安全带机构提供了限制作用, 避免乘员飞出发生二次碰撞。

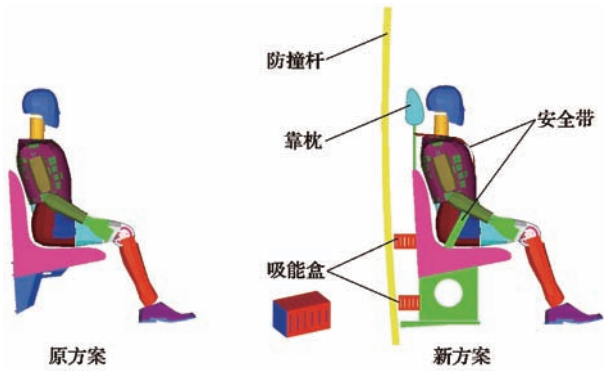


图 9 侧面碰撞乘员保护方案

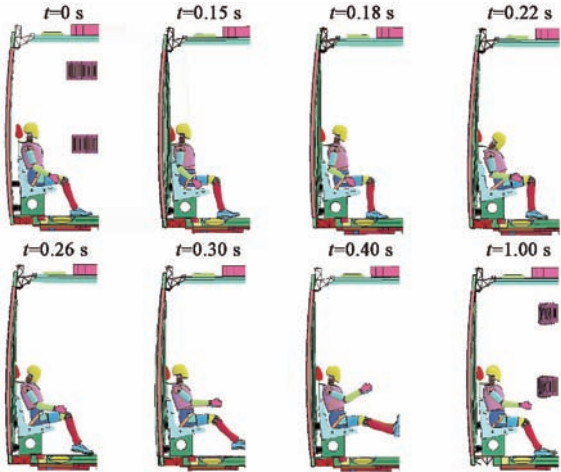


图 10 改进方案中乘员响应

为定量考察改进设计方案有轨电车在侧面碰撞中对乘员保护能力的改善程度,表 1 给出了针对侧面碰撞乘员保护改进设计前后乘员的部分生物学损伤值。

表 1 改进前后乘员损伤值对比

损伤指标	改进前	改进后	标准值
头部 HIC	1 217	373	<1 000
上颈部弯矩/(N·m)	113.6	35	<40
胸部压缩量/mm	13.6	26.4	<50

可见,针对侧面碰撞乘员保护的设计方案能有效改善碰撞对乘员头部以及颈部的伤害,改进方案中乘员胸部压缩量为 26.4 mm,较原方案 13.6 mm 有所增加,但仍处于标准规定的安全值之内,该变化主要是由安全带的限制作用引起的。

3 结论

本文通过建立的带假人有轨电车及大客车有限元模型和设计侧面碰撞场景,研究了侧面碰撞过程中有轨电车悬浮模块的耐碰撞性以及乘员响应,并针对侧面碰撞乘员保护设计提出了改进方案,得出主要结论如下:

①传统有轨电车侧面结构设计具有局限性,缺乏耐碰撞性设计,在受到公路车辆碰撞时铝合金侧墙易产生塑性变形侵入乘员生存空间。同时,传统悬浮模块乘员座椅一般安装在侧墙,在侧面碰撞中会随侧墙变形而发生运动,无法对乘员起到支持保护的作用。

②侧面碰撞中在座椅靠背的推动和惯性的作用下,乘员颈部会产生类似于汽车追尾碰撞的鞭打运动,乘员整体易向前飞出与车内结构发生二次碰撞。

③在侧墙铝合金型腔内采用螺栓连接的方式嵌入防撞杆,可将部分碰撞力流传递到底架及车顶,控制侧墙变形,降低生存空间侵入量。侧墙与座椅间安装压溃式吸能盒可以有效吸收部分碰撞能量。设置后靠枕可以保护乘员颈部,减轻挥鞭损伤,肩部和腰部安全带能够限制乘员位移避免飞出撞伤。

本文通过仿真计算手段,借鉴汽车领域被动安全设计经验,初步研究了有轨电车侧面碰撞相关问题,在阐述开展有轨电车侧面碰撞安全研究必要性的同时也对车辆设计工作提出了更高的要求。针对共享路权下有轨电车事故形式特殊性,在设计上与传统铁路车辆区别对待,同时也应广泛汲取汽车碰撞领域的成熟经验。

此外,有轨电车侧面碰撞安全相关研究方兴未艾,关于有轨电车侧面碰撞安全问题仍存在很多有待细化和深入研究的方向:

①文中所设计的碰撞场景中低地板有轨电车和大客车的速度、角度、质量大多基于现有研究、统计和经验,所以并不能代表公路上发生的所有事故情形,只能作为典型算例,研究低地板有轨电车在遭遇侧面冲击事故时的响应,后续研究可在本文基础上设计研究其他碰撞场景。

②文中使用某 6120 型大客车为具体车型,后续研究可建立代表大中型机动车的标准化壁障模型,作为有轨电车侧面耐碰撞性的通用验证工具。

③文中采用的假人模型为通用的 Hybrid-Ⅲ 第 50 百分位假人模型,后续研究中可使用更适于追尾碰撞的 BioRID-II 型假人开展乘员响应研究。

④ LS-DYNA 的接触算法并不能准确反映轮轨关系,使用动力学手段开展有轨电车运行过程中受到侧面冲击下的稳定性与脱轨风险研究具有极其重要的意义。

参考文献:

[1] Kirkpatrick SW. Development of Crash Energy Management Performance Requirements for Light-Rail Vehicles [J]. Tcrp Web Document, 2008.

[2] Ling L, Dhanasekar M, Thambiratnam D P, et al. Minimising lateral impact derailment potential at level crossings through guard rails [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 113: 49-60.

[3] Ling L, Dhanasekar M, Thambiratnam D P, et al. Lateral impact derailment mechanisms, simulation and analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 94: 36-49.

[4] Thomas D, Berg M, Persson R, et al. Improving crosswind stability of fast rail vehicles using active secondary suspension [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(7): 909-921.

(下转第 97 页)

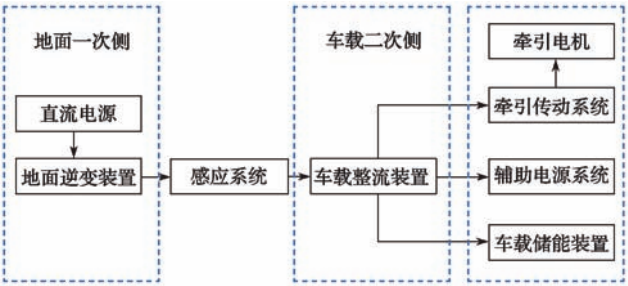


图 8 Primove 地面供电系统工作示意图

2.3.2 应用分析

①安全性: Primove 地面供电系统感应产生的电流是闭路的, 因此轨道内不会产生回流电流, 同时车辆侧高压设备的损坏不会造成顶网等事故的发生。

②经济性: Primove 地面供电系统的投资成本约为 (2 000~2 500) 万元 /km。

③可用性: Primove 地面供电系统可与传统架空接触网结合使用, 实现混合方式供电。目前仍处于试验验证阶段。尽管无线电感应的效率能达到 90% 以上, 但是由于能量的走向经过了逆变装置、无线电感应传输、整流装置等多个环节, 因此其系统效率较传统的接触式牵引系统低, 整个系统的效率在 50%~60% 左右; 地面一次侧与车载二次侧实现了物理隔离, 不会有集电靴和接触轨之间的磨耗问题, 雨雪天气也不会对系统的正常工作造成影响。

3 比较和分析

综合考虑国内外已执行、在执行的现代有轨电车供电方式, 架空接触网供电仍然是运用最广泛、最经济的供电方式 (见表 1)。但从现代有轨电车的定位及

表 1 现代有轨电车地面供电方式比较

项目	TramWave	APS	Primove
优势	技术新颖, 安全可靠	技术成熟, 供电可靠	无接触供电, 无磨耗
劣势	磨耗大、运营维护工作量大; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高	磨耗大、积水预防难度大; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高	多级能量传输、效率较低; 采用分段地面供电, 需铺设特殊轨道, 制造和后期运营维护成本高

发展趋势来看, 地面供电方式的有轨电车仍具有相当的优势。首先地面供电方式减少了架空接触网、承力索、电线杆所造成的视觉污染, 对现有城市基础设施影响较小; 其次地面供电方式应对极端特殊天气的能力更强。

4 结语

现代有轨电车供电系统是整个城市轨道交通非常重要的组成部分。相较于 TramWave 和 Primove 地面供电系统, 采用 APS 供电系统和架空接触网组合供电方式更为合理可行。架空接触网供电系统成本低、前期投入少、后期维护简便, 比较适合应用在远郊或地面低洼易产生积水的区域; 在路况较好、城区中心采用 APS 地面供电系统以保护城市现有景观。

参考文献:

[1] 苏国强, 郑磊, 黄坤林. 新型有轨电车供电方式分析 [J]. 铁路技术创新, 2013(6): 46-49.

[2] 吴泳江, 李芾. 现代有轨电车新型供电方式发展及运用现状 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2014(5): 5-9.

[3] 胡松, 刘志萍, 徐维祥. 我国新型有轨电车车辆选型及供电方式研究 [J]. 现代交通, 2014(3): 33-38.

[4] 沈继强. 现代有轨电车车辆选型和供电方式 [J]. 中国市政工程, 2012(5): 68-71.

[5] 吴梦芹. 新型轨道交通方式之现代有轨电车系统发展对策研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.

[6] 王健全, 袁富卫. 城市有轨电车供电方式探讨 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2015(1): 47-51.

[7] 陈志雄. 现代有轨电车无接触网技术应用分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(4): 117-121.

[8] 何斌. 现代有轨电车供电系统方案研究 [J]. 成都: 西南交通大学, 2016.

[9] 何治新. 现代有轨电车牵引供电方式选择 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(7): 105-108.

[10] 朱亮, 张继彤, 张济民. 低地板有轨电车无接触网供电技术的研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(9): 84-88.

[11] 孙康, 佟刚. 现代有轨电车供电方式的选择分析 [J]. 科技视界, 2015(11): 301-303.

[12] 吴其刚. 现代有轨电车系统发展的重难点及对策研究 [J]. 铁道工程学报, 2013(12): 89-92.

作者简介: 李雪松 (1986-), 男, 工程师, 长期从事轨道交通线路勘察设计及轨道车辆电气化研究。

(上接第 93 页)

[5] Shin K B, Lee J Y, Cho S H. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus [J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 228-240.

[6] Anghileri M, Castelletti L M L, Pirola M, et al. C IV class tram crashworthiness assessment [J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(4): 425-435.

[7] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 城际动车组车头耐碰撞性研究 [J]. 机车电传动, 2013(1): 60-63.

[8] Schroeder MP. Developing CEM design standards to improve light rail vehicle crashworthiness [C] //Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint. Rail conference, 2006: 141-147.

[9] Bocchieri R T, Kirkpatrick S W, Navarro-Northrup C, et al.

Collision Safety Improvements for Light Rail Vehicles Operating in Shared Right of Way Street Environments [C]. Texas: ASME 2009 Rail Transportation Division Fall Technical Conference, 2009: 61-70.

[10] Kovandova H, Valka R. Experimental Study of Non-Compatible Collision of Rail and Road Vehicle [J]. Promet-Traffic-Traffico, 2014, 26(6): 459-466.

[11] 李兆凯. 营运客车多形态正面碰撞安全性及评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

作者简介: 李 铎 (1989-), 男, 硕士, 从事机车车辆设计与可靠性研究。